УДК 553.411.496

ЗОЛОТО И ПЛАТИНОВЫЕ МЕТАЛЛЫ В МЕДНО-МОЛИБДЕН-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

А.Ф. Коробейников*, А.И. Грабежев**

*Томский политехнический университет, г. Томск. E-mail: lev@tpu.ru
**Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург. E-mail: grabezhev@igg.uran.ru

Среди месторождений порфировой рудной формации выделяются медно-порфировый (Au до 0,4 г/т, Cu /100 Au от 500 до 2000), золото-медно-порфировый (Au 0,5…3 г/т, Cu/100 Au 11…150) и медно-молибден-порфировый типы. Они отличаются различными содержаниями Cu, Mo, Au, Pt, Pd в рудах и сульфидных ассоциациях. При становлении материнских субвулканических гранитоидных магматических тел происходило рассеяние Au, Pt, Pd в разных типах возникавших пород: 1,8…4,1 мг/т Au, 0,5…6 мг/т Pt и 7…11 мг/т Pd. Автометасоматические процессы кислотного выщелачивания диоритов, порфиритов, гранодиоритов, плагиогранитов (серицитизация) приводили к незначительному накоплению благородных металлов (мг/т): 12…34 Au, 12…48 Pt, 12…78 Pd, $k_н$ 1,2…8,7 в продуктах метасоматоза. Лишь завершающие гидротермальные процессы окварцевания и сульфидизации магматитов обеспечивали богатую концентрацию благородных металлов в зонах метасоматоза: 0,5…12 г/т Au, 0,1…0,5 г/т Pt и 0,05…0,3 г/т Pd, $k_н$ 100…1600 и более. При эволюции порфировых магмо-флюидных колонн происходило обогащение золотом и частично платиной, палладием, осмием их апикальных частей и возникали субвулканические золото-медно-порфировые месторождения с сопутствующими элементами платиновой группы (ЭПГ). Регионы палеорифтогенеза и тектоно-магматической активизации с такими близповерхностными проявлениями порфировых интрузий островодужного типа и являются наиболее перспективными на поиски промышленного комплексного благороднометалльного оруденения.

Введение

В группу золото-платиносодержащих комплексных порфировых месторождений относятся медно-порфировые и медно-молибден-порфировые, а также собственно золото-порифровые рудные объекты. Они выявляются в различных геодинамических обстановках, но более всего они свойственны островодужным и окраинно-континентальным образованиям. Формировались такие рудные объекты при становлении тел базальт-андезитовой вулканической и габбро-диорит-плагиогранитной плутонической формаций натриевых серий на участках активного проявления процессов рифтогенеза и тектоно-магматической активизации отдельных блоков земной коры. Среди них выделяются магнетит-пиритовый, халькопирит-борнитовый, пирит-халькопиритовый, молибденитовый, полисульфидный, энаргит-полисульфидный минеральные типы [1–3]. Для месторождений свойственна отчетливая рудно-метасоматическая зональность: смена сверху вниз и от центра к периферии зон разных минералогических типов руд – магнетит-пиритового в зоне калиево-кремниевого метасоматоза → борнитового, молибденитового в калиево-кремниевых и кварц-хлорит-серицитовых метасоматитах → пирит-халькопиритового в кварц-хлорит-серицитовых, аргиллизитовых метасоматитах → пиритового в пропилитах. В медно-порфировых рудных объектах содержится 0,01…0,8 г/т Au, 0,05…0,3 г/т Pt, 0,005…0,04 г/т Pd, а в золото-медно-порфировых – 1…11 г/т Au, 0,01…6 г/т Pt, 0,01…0,3 г/т Pd. Медно-молибден-порфировые месторождения чаще несут убогое количество этих благородных металлов – 0,005…0,01 г/т [2, 4, 5].

Анализ опубликованных материалов по порфировым месторождениям показал, что запасы золота в зарубежных месторождениях составляют 2620 т [1]. Двадцать зарубежных месторождений медно-порфирового типа по запасам золота составили четыре группы: 1…10 т (5 объектов), 10…100 т (9), 100…1000 (5) и более 1000 т (1). Наиболее крупными из них оказались Пангуна (Папуа-Новая Гвинея, 400 т Au), Эль-Теньенте (Чили, 200 т), Биним-Карбон (США, 200 т), Чукикамата (Чили, 104 т), Сьерро-Колорадо (Панама, 90 т), Сан-Мануэль (США, 40 т), Эль-Сальвадор (Чили, 30 т). На территории стран СНГ к числу золотоносных и платиноносных порфировых объектов относятся месторождения Казахстана (Коунрад, Коксай, Бормы, Актогай, Чатыркуль, Саяк), Узбекистана (Алмалык), Малого Кавказа (Каджаран, Техут, Агарак), Урала (Салаватское, Зеленый Дол, Березняковское), Забайкалья (Шахтамикское, Давендинское, Жирекенское), Чукотки (Песчанка).

А.М. Орлов и др. [6] указывали, что при переработке медно-молибденовых руд в США ежегодно извлекали 1,5 т платиновых металлов, а в Канаде – 0,7 т Pt и 0,1 т Pd. В последние годы появилась информация о промышленно интересных концентрациях платиноидной минерализации в ряде порфировых месторождений Сибири и Урала [4, 7, 8]. Ограниченные данные о платиноносности порфировых месторождений Казахстана, Узбекистана, Армении, Болгарии, США, Канады, Филиппин имеются в публикациях С.Т. Бадалова, С.Л. Терехович [9], С.К. Калинина с соавторами [10], А.М. Орлова и др. [6], Л.С. Фармазян и др. [11], Т.А. Тодорова [12], А.М. Кунаева и др. [13], В.Г. Лазаренкова и др. [14], А.Х. Туресебекова и др. [15], I.L. Werle e.a. [16], M. Tarkian e.a. [17].

Все это и послужило основанием для поставки ревизионных геохимических исследований на Pt и Pd в золото-медно-порфировых рудных объектах Урала [4]. Аналитические определения платиновых элементов в горных породах, рудах, минералах выполнялись по разработанной Н.А. Колпаковой в геолого-аналитическом центре "Золото-платина" ТПУ новой методике инверсионно-вольтамперометрического анализа [18].

Платинометалльносодержащие месторождения медно-порфирового и золото-порфирового типов расположены в вулканоплутонических поясах базальтоидного магматизма натриевых серий. Во времени и в пространстве они сменяют однородные базальтовые и контрастные колчеданоносные вулканоплутонические формации [1, 2, 19]. Среди продуктивной минерализации выделяются такие минеральные типы: магнетит-пиритовый, халькопирит-борнитовый, пирит-халькопиритовый, молибденитовый, полисульфидный, энаргит-поли-

сульфидный [1–4]. Наиболее крупные рудные объекты сложены магнетит-пиритовыми и пирит-халькопиритовыми рудами. Халькопирит-борнитовые парагенезисы содержат включения дисперсных минералов Bi, Te, Se, Mo, Au, Ag, Pt, Pd. Основной объем благородных металлов находится в виде примесей самородных Au, Ag, Pt, реже электрума, аргентита в борните и халькопирите. В борнитовых рудах Рябинового порфирового месторождения на Алдане В.А. Коваленкером и др. [7] выявлены минералы элементов платиновой группы (ЭПГ): эрлихманит $(Os_{0,8}Ir_{0,15}Ru_{0,05})_{1,0}S_2$, мончеит Pt(Te, Ni). Рудные тела таких месторождений залегают в экзо- и эндоконтактах порфировых штоков, а внутренние части интрузивов оруденения обычно не содержат.

Особенности геологического строения и рудоносности Березняковского золото-медно-порфирового месторождения Южного Урала

Месторождение входит в состав Биргильдинско-Томинского рудного узла, находящегося в южном экзоконтакте Челябинского полихронного (C_1-P) гранитоидного плутона, в зоне сочленения Восточно-Уральской вулканогенной зоны с Восточно-Уральским поднятием. Для рудного узла характерно сложноблоковое строение. Медно-порфировые среднеглубинные месторождения (Северо-Томинское и др.) размещены в тектоническом блоке среди пород фундамента, представленных базальтоидами O_1, прорванными гипабиссальными малыми интрузиями кварц-диоритового состава D_3-C_1. Березняковское месторождение и Биксизакское проявление золото-порфирового типа находятся в Мичуринском блоке вулканогенно-осадочной постройки D_3-C_1 субвулканического уровня (рис. 1). Медно-порфировые руды приурочены к малым интрузивам кварцевых диоритов, диоритов, диоритовых порфиритов мезо-гипабиссального уровня формирования, а золото-медно-порфировые – к кварцевым диоритовым порфиритам субвулканического уровня.

Прожилково-вкрапленные, штокверковые комплексные золото-платиноидно-медносульфидные руды локализованы в линейных субширотных и северо-западных дизъюнктивных зонах среди кварц-плагиоклазовых диоритовых порфиритов D_3-C_1. Эти субвулканические тела прорывают туфы и кластолавы андезит-дацитового состава (D_3-C_1), образуя единую вулкано-плутоническую ассоциацию. Рудные тела размещаются преимущественно в диоритовых порфиритах, интенсивно рассланцованных, катаклазированных, милонитизированных. Они имеют сложноштокверковое внутренеее строение с изменчивой мощностью рудных тел и невыдержанными содержаниями благородных металлов. Форма рудных тел линейно-вытянутая, извилистая, линзовидная и столбообразная. Протяженность рудных тел до 300 м. Содержания золота и платиновых металлов в рудах составляют 0,6...11 г/т Au, 0,1...0,5 г/т Pt, 0,03...0,25 г/т Pd, 3...40 г/т Ag, а также 0,3...0,6 мас. % Cu, 0,3...0,5 Zn, Se и Te 0,06...0,13, Bi 2...50 г/т, Sb 10...500 г/т, Sn 8...30 г/т. Текстуры руд вкрапленные, пятнисто-гнездовые, прожилково-вкрапленные, брекчиевидные.

Околорудные измененные порфириты представлены агрегатами хлорита (5...12 об. %), карбонатов (2...15), серицита (10...20), пирита (3...12). Мощность зон метасоматитов достигает 200 м. В этих зонах выделяются тела слюдисто-кварцевых или пирофиллит-кварцевых метасоматитов или альбит-кварц-хлорит-карбонатного состава.

Наибольший промышленный интерес представляют Zn-Cu-Ag-Au-Pt рудные тела (Ag/Au=1…11, Au/Pt+Pd=1,8…5) с гесситом, теллуром, золотом и Zn-Cu-Au-Ag-Pd-Pt рудные тела (Ag/Au=10...12,

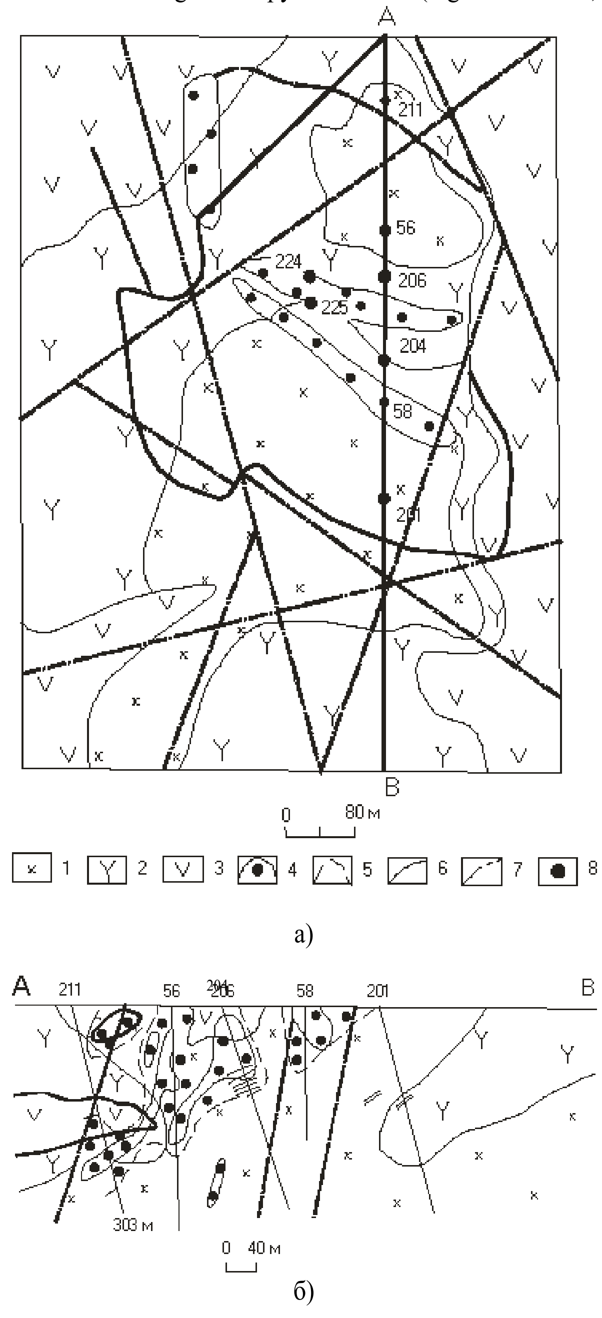


Рис. 1. Схематическая геологическая карта (а) и геологический разрез (б) Березняковского месторождения (по А.И. Грабежеву и др.).
1) кварцевые диоритовые порфириты, 2) субвулканические кварцевые андезитовые порфириты, 3) туфы осадочно-вулканогенной толщи D_3–C_1, 4) рудные тела, 5) контур рудной зоны, 6) границы пород, 7) разрывы, 8) скважины колонкового бурения

Au/Pt+Pd=1,8...2) с гесситом, ртутистым электрумом. Мощность таких рудных зон составляет 2...7 м, протяженность – сотни метров. Руды сложены (мас. %): пиритом (8...12), теннантитом, халькопиритом (1,5...6), сфалеритом (0,3...1), галенитом (0,3). Ранней сульфидной ассоциацией является пирит-халькопиритовая с редкими арсенопиритом, а поздней – золото-теллуридно-сфалерит-теннантитовая. Наиболее ценные минералы гессит, алтаит, петцит, золото пробы 820...860 ‰ (13...17 мас. % Ag), электрум (62 мас. % Ag), самородный теллур находятся в сфалерите, блеклой руде в форме дисперсных выделений размером 0,01...0,2 мм.

Продуктивная минерализация формировалась в две стадии: раннюю пиритовую и позднюю полиметаллическо-сульфидную. Пиритовая ранняя ассоциация включает метасоматический пирит в околорудных метасоматитах в виде прожилковых, гнездовых скоплений размером в первые десятки сантиметров. Отдельные кристаллы пирита имеют размеры 0,05...0,2 мм пентагондодекаэдрического габитуса, создают густую вкрапленность в метасоматитах. Иногда в таком пирите выявляются реликты раннего глобулярного пирита в ассоциации с графитом.

Фоновая вкрапленность, просечки, гнезда метакристаллов пирита свойственны пропилитам и аргиллизитам. В рудных зонах пиритизированные метасоматиты обогащены теннантитом, сфалеритом, пиритом, халькопиритом, галенитом, реже гесситом, калаверитом, сильванитом, креннеритом, алтаитом, пильзенитом, самородными теллуром и золотом. В результате возникали локальные минерализованные зоны и рудные тела. На этих участках индивиды пирита укрупняются до 1…1,5 мм, и кристаллы приобретают куб-пентагондодекаэдрический облик. Такой пирит обеднен примесями – присутствуют лишь Ni 0,04…0,06 мас. %, Co 0,1…0,18, As 0,16, и нередко раздроблен и замещается кварцем, карбонатами, полисульфидными агрегатами.

Полиметаллическо-сульфидная минеральная ассоциация развита на участках прожилкового окварцевания и карбонатизации пород. Она включает три парагенетических комплекса рудных минералов – золото-полиметаллическо-сульфидный, золото-теллуридно-полиметаллическо-сульфидный и теллуридно-полиметаллическо-сульфидный. В золото-теллуридно-полиметаллическосульфидном парагенезисе господствуют золото в ассоциации с алтаитом, гесситом, пильзенитом. В теллуридно-полиметаллическо-сульфидном парагенезисе самородное золото не встречено, но распространены его теллуриды – калаверит, креннерит, сильванит, а также самородный теллур.

Самородное золото в рудных телах двух генераций. Золото I генерации имеет пробы 970…984 ‰ и размеры золотин 0,005…0,01 мм. Это золото совместно с блеклой рудой выполняет интерстиции в агрегатах перекристаллизованного метасоматического пирита. Примеси в золотинах представлены (%): Cu – 0,08, Ag – 2,19, Hg – 0,12. Золото II генерации установлено в золото-теллуридно-полиметаллическосульфидном парагенезисе. Оно имеет пробы 800…860 ‰ и сопровождается ртутистым электрумом (Au 61,73 %, Ag 23,9, Hg 24,29), редкими айкинитом $CuPbBiS_3$ (Cu 10,96 %; Pb 36,05; Bi 36,89; Te 0,13; Fe 0,35; S 16,75 %), гесситом Ag_2Te, алтаитом PbTe, пильзенитом Bi_3Te_4. Размеры выделений этих минералов не превышают 0,15 мм среди пирита, блеклой руды и кварца. Самородное золото часто находится в срастании с гесситом. Количество пирита в рудах составляет 2…5 %. Раннее высокопробное золото I и блеклая руда выполняют интерстиции в агрегатах пирита, а низкопробное золото II и ртутистый электрум совместно с гесситом размещаются в теннантите. Золотины I генерации имеют пластинчатую и дендритную формы. Они содержат до 0,11 мас. % Pd и 0,014 Hg. В теллуридно-полиметаллическо-сульфидном парагенезисе золото II представлено калаверитом $AuTe_2$, креннеритом (Au, Ag)Te, сильванитом $(Au, Ag)_2Te_4$ в ассоциации с самородным теллуром. Размеры выделений золота в теннантите и кварце 0,01…0,1 мм.

Рудовмещающие диоритовые порфириты серицитизированы (± парагонит), а на выклинивании рудных зон замещаются анкеритом, кальцитом, пиритом (до 6…10 %). Для околорудных метасоматитов (аргиллизитов) свойственна ассоциация парагонита и K-Na слюды с примесью мусковита. На отдельных участках слюды представлены гидропарагонитом, парагонит-смектитом с переменным содержанием монтмориллонитовых слоев от 11 до 27 % [2, 3]. В общем метасоматическом ореоле слюды слагают 10…20 %, хлорит 5…15 %, карбонаты 5…20 % от общего объема пород. В этом ореоле находятся тела метасоматитов слюдисто-кварцевого или пирофиллит-кварцевого состава с сульфидами. Мощность таких бескарбонатных метасоматитов составляет 2…60 м при общей мощности зоны метасоматоза в 200 м. В этой зоне выделяются скопления карбонатных, карбонатно-кварцевых прожилков с сопровождающей карбонатизацией пород. Пирофиллит-кварцевые метасоматиты сопряжены с рудными телами и составляют зоны мощностью 60 м и более. В этих зонах нередко обособляются участки тонкозернистого роговикового кварца с сульфидами.

На основе кальцит-доломитового геотермобарометра вероятные температуры рудообразования определены в пределах 380...320 °С при давлениях растворов 0,8…1,2 кбар. Аргилизиты с монтмориллонитом, вероятно, формировались при температурах 240…160 °С и давлениях 0,1…0,4 кбар. Первоначально возникали пирофиллит-кварцевые ассоциации, а затем монтмориллониты. Изотопный состав серы пиритов $\delta^{34}S$ изменяется от –2 до –5 ‰ в рудах мезоабиссального Томинского медно-порфирового объекта, до +2…6 ‰ в рудах субвулканического Березняковского месторождения, а за пределами его зафиксировано возрастание значений $\delta^{34}S$ пирита до +4…9 ‰. На участках развития арсенопирита и кварц-барит-халькопиритовых жил Биксизакского проявления эти значения возрастают до +12…16 ‰.

Особенности распределения Au, Pt, Pd в магматических, метасоматических породах и рудах порфировых рудных месторождений

Предварительная информация по распределению этих благородных металлов дана в ранних публикациях

авторов и других исследователей [1–27]. К настоящему времени получены дополнительные геологические данные по содержаниям золота и платиновых металлов не только в золото-порфировых, но и в медно-порфировых и скарново-медно-порфировых месторождениях Урала.

В табл. 1, 2, на рис. 2 приведены результаты аналитических исследований Au, Pt, Pd по Березняковскому, Биксизакскому, Томинскому, Гумешевскому, Михеевскому, Тарутинскому месторождениям Урала.

Фоновые содержания благородных металлов определены для магматических пород рудных месторождений Южного Урала. Здесь гранитоиды, находящиеся за пределами порфировых рудных полей и месторождений, изучены на примере Мичуринской субвулканической медно-порфировой рудной зоны (D_3–C_1). Магматиты характеризуются повышенными против кларковых значений содержаниями золота: 6…23 мг/т. Лишь в небольшой части проб диоритовых порфиритов количества Au не превышают фоновых значений в 1…3 мг/т. Такие же оклокларковые значения концентраций Au выявлены в гранитоидах Челябинского плутона, расположенного в северной части рудного узла. В этих гранитоидах установлены пониженные содержания Cu до 0,01…0,02 мас. % вместо 0,1…0,3 мас. % в гранитоидах Томинской медно-порфировой малой интрузии. Породы порфировой малой интрузии повсеместно пропилитизированы, серицитизированы и несут обильную вкрапленность сульфидов. Количество серы в них достигает 1,5…3 мас. %, а в пределах медно-золоторудных зон даже 3…6 мас. %. В пирите и халькопирите из диоритов Томинского штока определено 0,5…9 г/т Au, а в отдельных пробах халькопирита 29 г/т Au. В сфалерите из массивных сфалерит-пиритовых руд Березняковского месторождения выявлено 1,2…2,6 г/т Au.

Содержания платины и палладия в исходных и гидротермально измененных диоритах, диоритовых порфиритах варьируют от 0,4 до 48 мг/т Pt и от 0,7 до 100 мг/т Pd, при средних значениях 6,8 мг/т Pt и 42 мг/т Pd. В зонах прожилково-вкрапленной сульфидной минерализации Березняковского золото-медно-порфирового месторождения содержания Pt достигают значений 323…500 мг/т, а Pd – 33…250 мг/т, при средних значениях для отдельных типов руд 93…323 мг/т Pt и 33…84 мг/т Pd. Кварцево-барит-сульфидные жильно-штокверковые руды Биксизакского проявления несут еще более значимые количества этих металлов: 170…2430 мг/т Pt и 80…250 мг/т Pd.

Напротив, вкрапленно-прожилковые руды Томинского медно-порфирового месторождения характеризуются пониженными концентрациями ЭПГ: 6,8…20 мг/т Pt и 42…76 мг/т Pd. В отличие от них вкрапленные медносульфидные руды Михеевского медно-порфирового и Гумешевского, Тарутинского скарново-медно-порфировых месторождений характеризуются устойчиво повышенными содержаниями платины и палладия – 400…3200 мг/т Pt и 600…2100 мг/т Pd, при низких содержаниях золота в 70…300 мг/т.

На диаграммах рис. 2 показано распределение Au, Pt, Pd в магматитах, рудах, минералах порфировых месторождений России и зарубежных стран. Из диаграммы видно, что промышленно интересные концентрации Au свойственны прожилково-вкрапленным медносульфидным рудам Березняковского, Биксизакского, Алмалыкского, Бощекульского, Каджаранского, Агаракского, Дастакертского, Джиндаранского, Айгедзорского, Санта-Томас II месторождений. Менее значимые содержания платины и палладия, представляющие тем не менее промышленный интерес, характерны для медносульфидных руд Березняковского, Биксизакского, Михеевского, Гумешевского, Тарутинского, Бощекульского, Каджаранского, Санта-Томас II, Аллардского месторождений. В этих рудных объектах концентрации Au, Pt, Pd достигают значений 8…29 г/т Au, 0,5…8 г/т Pt и 0,2…2,4 г/т Pd.

Следовательно, на Урале промышленно значимые концентрации платиновых металлов выявляются не только в рудных телах и окружающих сульфидоносных метасоматитах собственно золото-порфировых, но и скарново-медно-порфировых месторождений девон-карбонового возраста.

Кроме этого золото-медно-порфирового платиноносного оруденения на Урале выделяется аналогичное оруденение в Шеракабулакской, Медногорской рудных зонах (D_2) Магнитогорско-Мугоджарского прогиба и Желтыркольском месторождении, связанных с гранодиоритовыми интрузивами Зауральского поднятия [2–4].

На рис. 3 приведена диаграмма соотношений средних содержаний золота ($_{Au}$, мг/т) и показателя вариации (V_{Au}, %) в неизмененных гранитоидах, автометасоматитах и вкрапленно-прожилковых золото-медно-порфировых рудах Томинско-Мичуринского рудного узла Урала. Анализ диаграммы показал, что исходные диориты, диоритовые порфириты, гранодиориты, граниты отличаются пониженными количественными показателями (геохимическое поле I на графике 2, $_{Au}$ = 2…4 мг/т). Пропилитизированные их разновидности также характеризуются пониженными значениями $_{Au}$ и V_{Au}, (поле II), а серицитизированные гранитоиды – 2…3-кратными повышенными их значениями (поле III). Промышленно значимые концентрации этого металла (1…12 г/т Au) установлены в интенсивно сульфидизированных метасоматитах (серицитовые и аргиллизитовые) и прожилково-вкрапленных сульфидных рудах (поле V на рис. 3). Тем самым подчеркивается последовательно-ступенчатое накопление золота в зонах медно-порфирового рудогенеза Томинско-Мичуринского рудного узла с промышленно важным накоплением его при автомета- тических и поздних гидротермальных процессах: $К_{Au}$ н 100…1300 и более.

Для сравнения приведем разрозненные опубликованные данные по распределению платиновых металлов в порфировых рудных объектах Сибири и зарубежных территорий (рис. 2). В.И. Сотниковым [8] предварительно изучено распределение ЭПГ в медно-молибденовых рудах Сорского, Жирекенского, Давендинского месторождений Сибири. В рудоносных гранитоидах этих месторождений определено содержание платины до 10 мг/т, а палладия до

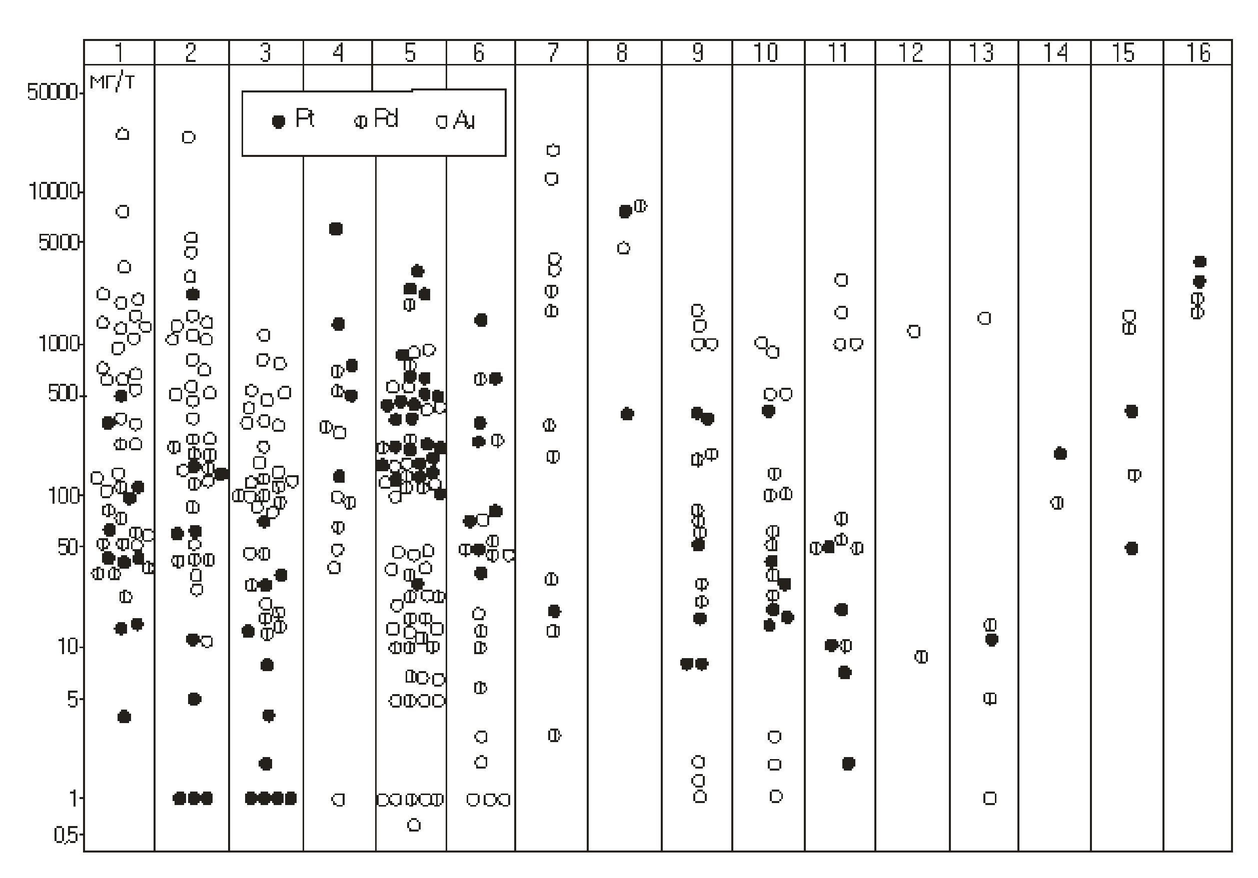


Рис. 2. Распределение Au, Pt, Pd в сульфидизированных гранитоидах, вкрапленно-прожилковых сульфидно-теллуридных рудах, пиритах, халькопиритах, сфалеритах, галенитах, борнитах и сульфидных концентратах золото-медно-молибден-порфировых месторождений мира.
Месторождения: 1) Березняковское золото-медное, Урал; 2) Биксизакское золото-медное, Урал; 3) Томинское медное, Урал; 4) Михеевское медное, Урал; 5) Гумешевское медное, Урал; 6) Тарутинское медное, Урал; 7) Алмалыкское медное, Узбекистан; 8) Бощекульское медное, Казахстан; 9) Каджаранское медное, Кавказ; 10) Агаракское медное, Кавказ; 11) Дастакертское медное, Кавказ; 12) Джиндаранское медное, Кавказ; 13) Айгедзорское медное, Кавказ; 14) Медетское Cu-Mo, Болгария; 15) Санта-Томас II, Филиппины; 16) Аллард, штат Колорадо, США

29 мг/т. В платиносодержащих пробах пород не обнаружена сульфидная минерализация. В молибденитах определены содержания Pt 8…36 мг/т и Pd 8…92 мг/т для Сорского, 1…380 мг/т Pt и 1…170 мг/т Pd для Жирекенского и 10…240 мг/т Pd для Давендинского рудных объектов. В Давендинском штокверковом медно-молибден-порфировом месторождении установлено накопление платиновых металлов в центральной части рудной зоны. Здесь концентрация платины достигает 34…380 мг/т, а палладия – 7…270 мг/т. На верхнем горизонте содержания Pt и Pd снижены на порядок, а на флангах рудной зоны не превышают фоновых значений. Молибдениты кварцевых жил и штокверков несут 88…300 мг/т Pt и 26…53 мг/т Pd. Максимальные содержания Pt и Pd выявлены в молибденитах брекчиевых сульфидных руд. Такая же тенденция распределения Pt и Pd установлена и для молибденитов Сорского медно-молибден-порфирового месторождения: 28 мг/т Pt и 52 мг/т Pd в молибденитах центральной зоны и 7,5 мг/т Pt и 12 мг/т Pd в периферических блоках. Содержания платиновых металлов в молибденитовом концентрате руд Сорского месторождения составили 61 мг/т Pt и 230 мг/т Pd. В сульфидных минералах медно-молибденовых руд месторождения Алмалык в Узбекистане содержания Pt и Pd не превышали значений – мг/т и лишь в молибдените определено повышенное количество ^{187}Os до 2000 мг/т [9]. Содержания Au и Ag в рудах, напротив, отличаются повышенными значениями 22…450 мг/т. По определениям С.К. Калинина с соавторами [10] в рудах этого медно-молибденового месторождения концентрации ЭПГ составили для Pt 0,33 г/т, Pd 2,5, Rh 0,005, Au 4, Ag 47; месторождения Бощекуль – 7,8 г/т Pt, 8,5 Pd, 0,7 Rh, 4,8 Au, 50 Ag; месторождения Каджаран в Армении – 0,39 г/т Pt, 0,2 Pd, 1,0 Au, 30,3 Ag; месторождения Агарак в Армении – 0,8 г/т Pt, 0,1 Pd, следы Au, 7,8 г/т Ag.

А.С. Фармазяном и др. [11] в рудах медно-молибден-порфировых месторождений Армении приводятся такие содержания благородных металлов: Каджаран – 18 мг/т Pt, 23…80 Pd, Au следы; Агарак – Pt 15, Pd 25…60, Au следы…600 мг/т; Дастакерт – 2…7 мг/т Pt, 10…74 Pd, 1000 Au; Айгедзор – 16 мг/т Pd, 1800 Au; Джиндара – 9 мг/т Pd и 1330 Au. В молибденитовых концентратах этих рудных объектов установлены концентрации благородных металлов (мг/т): Каджаран – 8…391 Pt, 50…220 Pd, 1000…2000 Au; Агарак – 18…40 Pt, 32…160 Pd, 500…1000 Au; Дастакерт – 12…50 Pt, 5…50 Pd, 1000 Au; Айгедзор – 12 Pt, 5 Pd, следы Au.

Т.А. Тодоров [12] отметил следующие содержания ЭПГ в минералах порфировых месторождений Болгарии: в халькопиритах месторождения Медет 216 мг/т

Таблица 1. Содержание платиноидов и золота в породах Томинско-Мичуринского рудного узла, мг/т

№	Тип	Pt	Pd	Au	№	Тип	Pt	Pd	Au	№	Тип	Pt	Pd	Au
1	I	< 1	7	12	26	II	17	26	150	51	V	< 1	20	41
2		< 1	12	33	27		40	75	107	52		< 1	36	50
3		< 1	66	30	28		41	61	380	53		< 1	9	60
4		< 1	110	15	29		42	85	130	54		1	31	23
5		< 1	12	11	30		62	53	250	55		1	6	9
6		< 1	46	13	31		98	37	670	56		1	9	4
7		< 1	46	11	32		120	35	51	57		1	38	4
8		< 1	110	18	33		323	33	630	58		3	63	34
9		< 1	30	11	34		500	250	58	59		4	41	20
10		< 1	36	25	35			210	135	60		12	61	75
11		< 1	53	6	36			230		61		16	55	33
12		1	120	25	37	III	5	42	189	62		36	12	8
13		2	61	25	38		11	210	11	63	VI	< 1	12	340
14		3	210	33	39		188	210	32	64		1	18	460
15		5	150	15	40		2430	250	28	65		1	140	100
16		6	39	5	41	IV	< 1	42	1800	66		1	100	255
17		12	27	7	42		1	85	1060	67		2	20	780
18		15	75	15	43		61	240	1150	68		4	30	45
19		30	24	26	44		63	180	800	69		5	46	130
20		48	60	22	45		170	41	540	70		8	17	1040
21	II	< 1	91	128	46	V	< 1	25	21	71		13	100	110
22		1	20	660	47		< 1	46	45	72		30	120	90
23		4	120	530	48		< 1	18	5	73		33	46	820
24		6	51	460	49		< 1	30	5	74		70	94	21
25		15	53	1400	50		< 1	5	75					

Примечание: I–IV – субвулканическая Мичуринская зона: I – диоритовые порфириты от слабо до сильно серицитизированных; II – обогащенные сульфидами участки Березняковского золото-порфирового месторождения; III – барит-халькопиритовые участки во фтанитах Биксизакского рудопроявления; IV – апокарбонатные массивные халькопирит-сфалерит-пиритовые руды Биксизакского рудопроявления. V–VI – мезо-гипабиссальная Томинская зона (Томинское медно-порфировое месторождение): V – диоритовые порфириты от слабо до сильно серицитизированных (содержания меди 0,1…0,3 мас. %); VI – обогащенные сульфидами участки. Анализы выполнены инверсионно-вольтамперометрическим методом [4, 5] из навески в 5 г в Томском политехническом университете

Pt, 95 Pd, 24 Rh. На месторождении Элаците выявлены минералы ЭПГ меренскит и палладоарсенид.

Незначительно повышенные концентрации Pt и Pd определены в золото-медно-порфировых рудах борнит-халькопирит-магнетитовой ассоциации Филиппин: 160 мг/т Pd, 39 Pt, 1,8 г/т Au [17]. В сульфидных концентратах этих руд содержания ЭПГ оцениваются как 1,5 г/т Pd и 0,4 г/т Pt. Минералы ЭПГ меренскит, котульскит, мончеит присутствуют в виде мелких включений в халькопирите и борните. В концентратах сульфидов меди из медно-порфирового месторождения Аллард штата Колорадо (США) отмечаются содержания платиновых металлов (г/т): 2,9…3,9 Pt и 1,9…2,3 Pd [16].

В медносульфидных концентратах порфировых месторождений других регионов мира отмечаются повышенные содержания Pt и Pd: в месторождении Элаците (Болгария) – 170 мг/т Pt и 760…1900 Pd; в месторождении Мамут (Малайзия) – 450…490 мг/т Pt и 1180…1600 Pd; в месторождении Ок-Теди (Папуа-Новая Гвинея) – 8…24 мг/т Pt и 650…980 Pd [17].

Даже такой краткий анализ изученной платиноносности разных типов месторождений медно-молибден-порфировой формации свидетельствует о том, что многие минеральные типы данных рудных объектов несут промышленно значимые концентрации не только Au, Ag, Te, Se, Bi, Tl, но и платиновых металлов, особенно Pt, Pd, Rh и Os.

Выводы

1. Среди месторождений порфировой рудной формации выделяются медно-порфировый (Au ≤ 0,4 г/т, Cu/100 Au ≤ 500…2000), золото-медно-порфировый (Au 0,5…3 г/т, Cu/100 Au 11…150) и медно-молибден-порфировый типы. Они отличаются разными содержаниями Cu, Mo, Ag, Au, Pt, Pd, Re, Os в рудах и сульфидных скоплениях. Такие комплексные месторождения свойственны островодужным и реже окраинноконтинентальным обстановкам на участках активного проявления процессов рифтогенеза и тектоно-магматической активизации отдельных блоков земной коры. Рудные ассоциации формировались при становлении тел базальт-андезитовой вулканической и габбро-диорит-плагиогранитной плутонической формаций натриевой серии.

2. При формировании субвулканических магмо-рудно-метасоматических порфировых колонн благородные металлы создавали промышленно значимые концентрации ступенчато-последовательно. В период становления гранитоидных интрузий без существенного проявления автометасоматоза Au и ЭПГ благодаря проявлению нейтральных свойств обеспечивали низкофоновые их концентрации во всех типах горных пород: $k_н$ = 1,0.

Таблица 2. Распределение Au, Pt и Pd (мг/т) в метасоматитах и рудах золото-медно-порфировых месторождений Урала

[illegible]	Число проб	Pt	Pd	Au	Au/Pt+Pd
[illegible]					
[illegible]					
[illegible]	9	[illegible]	[illegible]	[illegible]	1,9
[illegible]	1	[illegible]	17	670	[illegible]
[illegible]	1	111	11	610	[illegible]
[illegible]					
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0,09
[illegible]	1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	6,1
[illegible]	1	1–61 / 11	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]					
[illegible]	7	[illegible]	[illegible]	[illegible]	7,1
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	10
[illegible]					
[illegible]	1	[illegible]	[illegible]	[illegible]	0,06
[illegible]	[illegible]	[illegible]	1–120 / 79	[illegible]	0,7
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	–	–
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	1–11 / 7,7	[illegible]	1,10
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	1(7)	70	[illegible]	[illegible]	0,09
[illegible]					
[illegible]	1	6100	66	100	0,01
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	700	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]					
[illegible]	1	1700	610	71	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	1	170	[illegible]	7	0,01
[illegible]	1	[illegible]	10	[illegible]	[illegible]
[illegible]	1	610	170	1	0,001

и-
версионно-вольтамперометрическим методом в лаборатории геолого-аналитического центра “Золото-платина” Томского политехнического университета с чувствительностью $1 \cdot 10^{-7}$ мас. %, воспроизводимостью повторных анализов 80…90 % из навески 1…5 г. Аналитики: З.С. Михайлова (Au, Pd), Э.В. Горчаков, Е.В. Смышляева (Pt)

В период интенсивного кислотного выщелачивания магматитов, выразившегося в серицитизации пород, происходило перераспределение металлов и незначительный их привнос глубинными гидротермами: $k_н$ =1, 2...3. Лишь в завершающий период гидротермального окварцевания и сульфидизации пород осуществлялось максимальное накопление Au и ЭПГ в апикальных частях магмо-рудно-метасоматических порфировых колонн, вплоть до образования крупных промышленных месторождений: $k_н$ = 150…2800.

3. Поведение Pt и Pd в магматических и метасоматических процессах порфировых интрузий сходно с таковым более изученного поведения золота. При процессах дифференциации и кристаллизации расплавов не

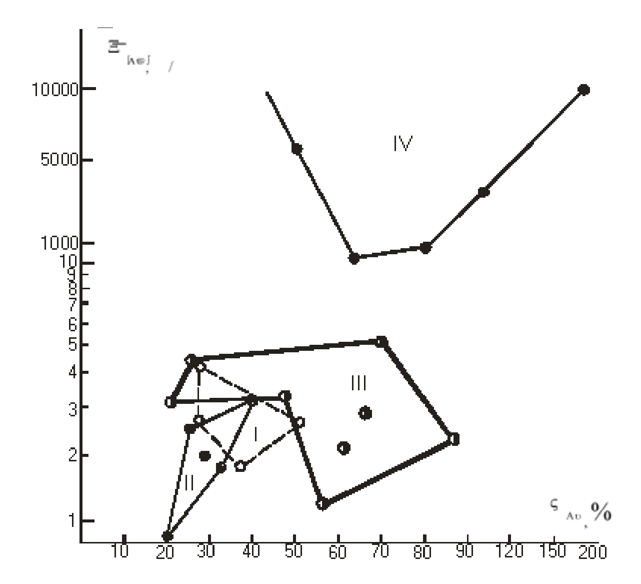


Рис. 3. Распределение Au в золотоносно-платиноносных медно-порфировых интрузивах Южного Урала (по А.Ф. Коробейникову и А.И. Грабежеву).
Поля распространенности Au в горных породах Березняковского, Томинского месторождений и Биксизакского проявления: I) в неизмененных диоритовых порфиритах, диоритах, гранодиоритах, плагиогранитах, D_3-C_1; II) в пропилитизированных диоритах, вулканитах; III) в сульфидизированных диоритах, серицитизированных гранитоидах; IV) в сульфидизированных серицитовых метасоматитах и вкрапленных медно-цинк-серебряных сульфидных рудах

установлено накопление этих металлов в разных типах магматитов: $k_н = 1,0$.

Фоновые содержания ЭПГ в магматитах разного состава варьируют в пределах 0,5…6 мг/т Pt и 7…11 мг/т Pd. Формирование серицитовых автометасоматитов порфировых систем сопровождалось незначительным накоплением Pt и Pd в продуктах автометасоматоза до $k_н$ = 1,3...8,7. Лишь процессы заключительного гидротермального окварцевания и сульфидизации пород отдельных горизонтов рудно-метасоматических колонн приводили к накоплению этих металлов до 0,2…3,6 г/т $k_н^{ЭПГ}$ = 100…600). Однако более значимой концентрации Pt и Pd в продуктах гидротермального метасоматоза и сульфидизации порфировых колонн Сибири и Урала пока не выявлено.

4. Геохимические исследования показали, что промышленно важное накопление Au, Pt, Pd, Os в зонах гидротермального выщелачивания и сульфидизации пород магмо-рудно-метасоматических колонн порфировых интрузий происходило на субвулканическом уровне и слабо проявлялось на средне-гипабиссальном уровне.

Поэтому прогнозно-поисковые работы на благородные металлы в первую очередь следует проводить в апикальных частях порфировых интрузий и в тех регионах, где активно проявилась субвулканическая деятельность гранитоидных интрузий благодаря процессам рифтогенеза и тектоно-магматической активизации структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кривцов А.И., Мигачев И.Ф., Минина О.В. Зональность и золотоносность руд медно-порфировых месторождений. – М.: ВИЭМС, 1985. – 47 с. (Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений металлических полезных ископаемых: Обзор).
2. Грабежев А.И., Молошаг В.П. Zn-Cu-Ag-Au-оруденение Томинского медно-порфирового рудного узла (Южный Урал) // Доклады РАН. – 1993. – Т. 300. – № 3. – С. 349–351.
3. Грабежев А.И., Коробейников А.Ф., Молошаг В.П. Золото в медно-золото-порфировых месторождениях Урала // Геохимия. – 1995. – № 10. – С. 1465–1471.
4. Коробейников А.Ф., Грабежев А.И., Молошаг В.П. Поведение платины, палладия, золота при формировании медно-порфировой рудообразующей колонны (Томинско-Мичуринский рудный узел, Урал) // Доклады РАН. – 2002. – Т. 383. – № 5. – С. 668–671.
5. Беневольский Б.И., Зубатарева Л.И., Мишиева Н.В. Благородные металлы в комплексных рудах зарубежных месторождений. – М.: ВИЭМС, 1991. – 47 с.
6. Орлов А.М., Борбыш В.Ф., Гедгагова Н.Н. Производство металлов платиновой группы за рубежом. – М.: ЦНИИЦВЕТМЕТ, 1975. – 64 с.
7. Коваленкер В.А., Мызник И.К., Кочетков А.Я., Наумов В.Б. Платиноносное золото-сульфидное оруденение Рябинового щелочного массива (Центральный Алдан, Россия) // Геология рудных месторождений. – 1996. – Т. 38. – № 4. – С. 345–356.
8. Нетрадиционная платиноидная минерализация Средней Сибири / А.М. Сазонов, О.М. Гринев, Г.И. Шведов, В.И. Сотников. – Томск: Изд. ТПУ, 1997. – 148 с.
9. Бадалов С.Т., Терехович С.Л. К геохимии элементов платиновой группы в Алмалыкском рудном районе (УзбССР) // Доклады АН СССР. – 1966. – Т. 168. – № 6. – С. 1397–1400.
10. Калинин С.К., Файн Э.С., Егизбаева К.Е. Стабильный изотоп осмий-187. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 95 с.
11. Фармазян А.С., Калинин С.К., Терехович С.Л. Особенности геохимии элементов группы платины в рудах медно-молибденовых месторождений Армении // Доклады АН СССР. – 1970. – Т. 190. – № 6. – С. 1455–1457.
12. Тодоров Т.А. Минералы и минерализация платиновых металлов в Болгарии: состояние изученности проблемы // VII Международный платиновый симпозиум: Тезисы докл. – М., 1994. – С. 111.
13. Кунаев А.М., Калинин С.К., Ли И.Е. Распределение изотопа ^{187}Os в продуктах Джезказганского и Балхашского медеплавильных заводов // Химия и технология осмия. – Алма-Ата, 1985. – С. 195–200.
14. Лазаренков В.Г., Петров С.В., Таловина И.В. Геохимия элементов платиновой группы. – СПб, 2001. – С. 207–212.
15. Туресебеков А.Х., Каширский С.А. Технологическая минералогия и оценка руд в связи с комплексным освоением медно-молибденовых и других месторождений Республики Узбекистан // Тез. докл. ВМО. – СПб, 2001. – С. 104–106.
16. Werle J.L., Ikzamuddin M., Mutscheer F.E. Allard stock, La

Plata Mountains, Colorado-analkaline rock-hosted porphyry copper-precious metal district // Canad. J. Earth. Sci. – 1984. – V. 21. – № 6. – P. 630–641.

17. Tarkian M., Coopmar G. Platinum-group minerals in the Santo-Tomas II (Philex) porphyry copper-gold deposit, Luson-Island, Philippines // Mineral Deposits. – 1995. – V. 30. – P. 39–47.
18. Колпакова Н.А., Иванов Ю.А., Коробейников А.Ф. Определение платиновых металлов в рудах и концентратах методом инверсионной вольтамперометрии // Платина России. Проблемы развития минералого-сырьевой базы платиновых металлов. – М.: АОЗТ "Геоинформмарк", 1995. – Т. II. – Кн. 1. – С. 181–184.
19. Авдонин В.В. Принципы геолого-промышленной типизации рудных месторождений. – М.: ЗАО: "Геоинформмарк", 1999. – 40 с. (Геология, методы поисков, разведки и оценки твердых полезных ископаемых: Обзор).

УДК 552.322+553.411.071